



RAPPORT LNR 5439-2007

## Hjerkinnskytefelt 2001-2006

Overvåking av metaller i bekker,  
elver og grunnvannsbrønner



*Stridsvognfeltet Haukberget II med blanderinger. Haukberget i bakgrunnen  
(foto: Jarl Eivind Løvik, NIVA)*

**Hovedkontor**

Gaustadalléen 21  
0349 Oslo  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 22 18 52 00  
Internet: www.niva.no

**Sørlandsavdelingen**

Televeien 3  
4879 Grimstad  
Telefon (47) 18 51 00  
Telefax (47) 37 04 45 13

**Østlandsavdelingen**

Sandvikaveien 41  
2312 Ottestad  
Telefon (47) 18 51 00  
Telefax (47) 62 57 66 53

**Vestlandsavdelingen**

Postboks 2026  
5817 Bergen  
Telefon (47) 18 51 00  
Telefax (47) 55 30 22 51

**Akvaplan-niva**

9296 Tromsø  
Telefon (47) 77 75 03 00  
Telefax (47) 77 75 03 01

Tittel Hjerkinn skytefelt 2001-2006.  Overvåkning av metaller i bekker, elver og grunnvannsbrønner	Løpenr. (for bestilling) 5439-2007	Dato 01.06.07
	Prosjektnr. Undernr. 26276	Sider Pris 21 + vedlegg
Forfatter(e) Sigurd Rognerud	Fagområde miljøgifter	Distribusjon
	Geografisk område Oppland fylke	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Forsvarsbygg, Region Østlandet	Oppdragsreferanse Odd-Erik Martinsen
----------------------------------------------------	-----------------------------------------


Rapporten er en oppdatering av forrige årsrapport og omhandler resultatene fra undersøkelsene av vannkvalitet i bekker (2000-2006) og grunnvannsbrønner på Storranden (2004-2006) i Hjerkinn skytefelt. Til tross for betydelig metalldeponier etter nær 80 års militær bruk er konsentrasjonene av metaller i feltets bekker overraskende lave. Lite nedbør, kalkrikt jordsmonn og nøytralt til svakt basisk miljø er forhold som gir lav korrosjonshastighet av prosjektilrester og liten bevegelighet av løste metaller i markvannet. Forurensningsgraden var ubetydelig for bly og generelt liten til moderat for kobber, sink og nikkel (untatt bekken fra demoleringsfeltet i Grisungdalen som var moderat til markert forurenset). Utlekking fra korroderte prosjektilrester økte konsentrasjonene av kobber og sink i bekkene gjennom Haukberget og flyfeltet i Grisungdalen. Disse metallene i tillegg til nikkel lekker ut fra gruvegrusen til bekken på Haukberget. Konsentrasjonene av metaller varierte betydelig i grunnvannsbrønnene. Varierende oppholdstid i grunnvannsmagasinet gjennom året og veksling mellom reduktivt og oksidativt miljø i deponiet er antagelig årsaken til dette. De høyeste konsentrasjonene av metaller i brønnene skjer i perioder med liten vanngjennomstrømning, men dette er av liten betydning for vannkvaliteten i bekkene nedstrøms grunnvannsmagasinet.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Hjerkinn skytefelt	1. Hjerkinn shooting range
2. Metallkonsentrasjoner i bekker	2. Metals concentrations in brooks
3. Metallkonsentrasjoner i grunnvann	3. Metals in groundwater
4. Forurensningsgrad	4. Degree of impact



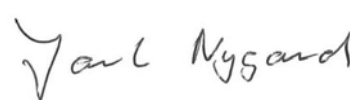
Sigurd Rognerud

Prosjektleder



Brit Lisa Skjelkvåle

Forskningsleder



Jarle Nygard

Fag og markedsdirektør

ISBN 82-577-5174-6

Hjerkinn skytefelt 2001-2006

**Overvåkning av metaller i bekker, elver og  
grunnvannsbrønner.**

## Forord

Denne rapporten omhandler overvåking av vannforekomster (bekker og grunnvann) i Hjerkinns skytefelt (2004-2006). Undersøkelsen dekker vanndirektivets krav til overvåkning og kontroll av vannressurser som er utsatt for tilførsler av giftige og vanskelig nedbrytbare forbindelser. Resultatene skal brukes i forbindelse med Forsvarsbyggs planer om oppryddinger av forurensningskilder i forbindelse med tilbakeføringen av Hjerkinns skytefelt til sivile formål. Det er tidligere utgitt tre årsrapporter som omhandler forurensningssituasjonen i vassdragene i Hjerkinns skytefelt (Rognerud 2002, 2003 og Rognerud *et al.* 2004).

Prosjektet ble kontraktfestet den 4. desember 2006 og Forsvarsbygg (FB), utvikling ØST er oppdragsgiver. Kontaktperson i FB er prosjektleder/koordinator Odd-Erik Martinsen.

Sigurd Rognerud (NIVA) har samlet inn alle vannprøvene untatt i 2004 da Odd Erik Martinsen samlet inn prøvene. Metallanalysene i vann ble utført av AB Analytica (2001-2003) og NIVAs laboratorium i Oslo (2004-2006). En takk til Odd Erik Martinsen og personalet på Hjerkinns skytefelt for all assistanse ved prøvetakningsrundene

Ottestad, juni 2007



*Sigurd Rognerud*

Sigurd Rognerud

---

# **Innhold**

<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>1. Innledning</b>	<b>6</b>
<b>2. Metoder</b>	<b>8</b>
2.1 Innsamling	8
2.2 Vannanalyser	8
<b>3. Resultater</b>	<b>8</b>
3.1 Vannanalyser i bekkene	8
3.1.1 Viktige vannkvalitetsvariable for metallers mobilitet	8
3.1.2 Alle delfelter unntatt Storranden og Svåni	10
3.1.3 Konsentrasjonsendringer av metaller i bekkene gjennom demoleringsfeltet i Grisungdalen, stridsvognfeltet på Haukberget og flyfeltet	12
3.1.4 Svåni og bekkene på Storranden	13
3.1.5 Metallkonsentrasjoner og SFTs vannkvalitetskriterier i elver og bekker	14
3.2 Vannkvaliteten i grunnvannsbrønnene	15
<b>4. Diskusjon</b>	<b>18</b>
<b>5. Litteratur</b>	<b>20</b>
<b>6. Vedlegg</b>	<b>22</b>

---

## Sammendrag

Rapporten omhandler resultatene fra overvåking av vannkvalitet i Hjerkinns skytefelts bekker (2001-2006) og i grunnvannsbrønner på Storranden (2004 og 2006). Hensikten med overvåkingen er å sikre en god dokumentasjon av vannkvaliteten i skytefeltets bekker og i grunnvannsutsiget fra deponiene i forbindelse med det planlagte anleggsarbeidet som skal tilbakeføre feltet til sivile formål. Resultatene fra rapporten er en del av grunnlaget for Forsvarsbyggs arbeid med oppryddinger og sikring av forurensningskilder i forbindelse med tilbakeføringen av Hjerkinns skytefelt til sivile formål.

Hjerkinns skytefelt (165 km<sup>2</sup>) ligger på Dovrefjell og vannforekomstene i feltet består av bekker av ulik størrelse samt et lite antall innsjøer. Geologien er variert og dette fører til betydelige regionale forskjeller i vannkvalitet. Skytefeltet har vært i militær bruk i over 80 år. Beregninger viser at etter 1950 har det vært deponert totalt ca. 770 tonn kobber, 250 tonn bly, 30 tonn antimon og 22 tonn sink. I tillegg er betydelig mengder metallholdig grus fra gruvevirksomheten i Tverrfjellet, anriket på arsen, nikkel, kobber, kadmium og sink, benyttet til bygging av veier, blanderinger, målområder (HFK-sletta) og kjøretrasser for stridsvogner.

Til tross for disse betydelige deponiene av metaller er konsentrasjonene i bekkene overraskende lave. Forurensningsgraden for kobber, sink og nikkel er liten til moderat, med unntak av bekken fra demoleringsplassen i Grisungdalen som er moderat til markert forurenset av kobber og sink. Bekkene i skytefeltet er ikke forurenset av bly. Konsentrasjonene av bly, sink og nikkel i skytefeltets bekker er på nivå med de som vanligvis observeres i norske vannforekomster, men kobberverdiene er noe høyere antagelig som følge av utlekking fra gruvegrus og korroderte prosjektilrester på Haukberget og korroderte prosjektiler i flyfeltet i Grisungdalen. De lave blykonsentrasjonene i bekkene skyldes at deponerte blyfragmenters overflate etterhvert dekkes av en skorpe bestående av blykarbonater og blyulfater som reduserer videre oksidasjonen av metallisk bly til et minimum, og følgelig også utlekkingen av løst bly til markvannet. Løste blyioner som likevel lekker ut vil bindes i jorda til metall-oksider eller som nesten uløselige bly-fosfor mineraler (pyrromorfitt). Bly i bekkene forekommer derfor i hovedsak som lite biotilgjengelige eroderte blymineraler fra nedbørfeltet, enten naturlig forekommende eller dannet ved korrosjon av prosjektilrester.

I motsetning til bly dannes det vanligvis ikke signifikante mengder av kobber-, sink- og nikkelsalter i vann, men organisk materiale i form av løste humus- og fulvosyrer danner stabile komplekser med løst kobber samt med sink og nikkel i alkalisk miljø. Dette stemmer godt overens med våre resultater der konsentrasjonene av disse metallene samvarierte signifikant med løst organisk materiale (TOC). Bindingen til ”metalltransportøren” løst organisk materiale og en mindre stabil skorpe av salter på prosjektilrestene er hovedårsaken til at disse metallene er mer mobile enn bly i skytefeltet.

Storranden er en løsmasseforekomst som inneholder store mengder sortert materiale og et betydelig grunnvannsmagasin. I denne løsmassen er det flere tidligere massetak med tre deponier der utlekking overvåkes i 8 grunnvannsbrønner lokalisert i eller nær deponiene. Forsvarsbygg har søkt om fylling av gruvegrus og masser som inneholder sprengstoffrester i to av massetakene. Konsentrasjonene av metaller varierte betydelig i brønnene ved ulike prøvetakingstidspunkter. Varierende oppholdstid i grunnvannsmagasinet gjennom året og veksling mellom reduktivt og oksidativt miljø i deponiet er antagelig årsaken til dette. Tidligere har vi vist at metallkonsentrasjonene i små bekker som starter i grunnvannsutslagene i forkant av denne løsmasseviften er lave. Det er derfor rimelig å anta at tidvis høye konsentrasjoner av metallene i brønnene skjer i perioder med liten vanngjennomstrømming, men dette er ikke av stor betydning når grunnvannet fra magasinet slår ut i dagen nedstrøms løsmasseviften.

# 1. Innledning

Hjerkinn skytefelt (165 km<sup>2</sup>) ligger på Dovrefjell og omfattes i hovedsak av nedbørfeltene til Grisungbekken, Svåni og Grøna (Fig.1). De to første bekkene utgjør øvre deler av Drivas nedbørfelt, mens Grøna renner ned i Lågen like nordvest for Dombås. Vannforekomstene i feltet består av bekker av ulik størrelse og et lite antall innsjøer. Skytefeltet ligger i sin helhet over 1000 m og har lav årsnedbør. Geologien er variert og dette fører til betydelige regionale forskjeller i vannkvalitet. Den nordligste delen består av feltspatholdig kvarsitt, øyegneis og innslag av kalkspatholdig fyllitt. De midtre deler består av kalkspatholdig fyllitt/glimmerskifer, mens i syd er berggrunnen dominert av grønn og grå fyllitt (Fig.2). Svåni og Grøna påvirkes av kaldt og turbid brevann sommer og høst.

Hjerkinn skytefelt har vært i militær bruk i over 80 år. I hovedsak har det vært Hæren og Luftforsvaret som har benyttet feltet. Testvirksomhet i forbindelse med våpenindustriens produktutvikling og demolering av ammunisjon har også vært en vanlig aktivitet i feltet. Det er deponert prosjektiler etter bruk av handvåpen, artilleri, bombekastere, stridsvogner, raketartilleri og fly. I feltet finnes også etterlatenskaper etter tyskerenes virksomhet under krigen. En gruppe nedsatt av Forsvarets militære organisasjon har kartfestet militær aktivitet i ulike tidsperioder etter 1950, og beskrevet omfanget av aktiviteten. På bakgrunn av dette arbeidet og metallinnholdet i prosjektiler/ammunisjon har Forsvarets Logistikkorganisasjon (FLO/Land) estimert at det totalt er deponert ca. 770 tonn kobber, 250 tonn bly, 30 tonn antimon og 22 tonn sink i skytefeltet (Roseth et al. 2003). Betydelig mengder metallholdig grusmasser fra gruvevirksomheten i Tverrfjellet er benyttet til bygging av veier, målområder, HFK-sletta og kjøretraser for stridsvogner. Utløsning av metaller fra disse massene er også en potensiell forurensningskilde i skytefeltet. Gruvegrusen var anriket på arsen, nikkel, kadmium, sink og kobber i forhold til det en vanligvis observerer i innsjøesedimenter i Norge (Rognerud 2003). På bakgrunn av erfaringene fra undersøkelsene i 2002 ble programmet for overvåkingen i 2003 noe endret. Bekkene fra Einøvlingvatni, Kollaområdet, Tverrfjellet, Breidskaret og Grøna (st. 12, 13, 14, 19, 20, 23 og 24) var ubetydelig forurensset og de ble ikke undersøkt i 2003. Resten av stasjonene ble også undersøkt i 2003 samt tre nye lokaliteter (st.60, 61 og 62) på Storranden. Disse er knyttet til avrenning fra et område som omfatter søppelplasser og et metall/ammunisjonsdeponi. I 2004 og 2006 ble noen færre stasjoner undersøkt i bekkene.

Det er satt ned 8 grunnvannsbrønner i 3 deponier som ligger i massetakene på Storranden. Vi har undersøkt vannkvaliteten i disse brønnene i 2004 og 2006. Forsvarsbygg ønsker å sikre disse eksisterende deponiene samtidig med at det er søkt om en fremtidig fylling med gruvegrus og masser som inneholder eksplosivrester i samme området.

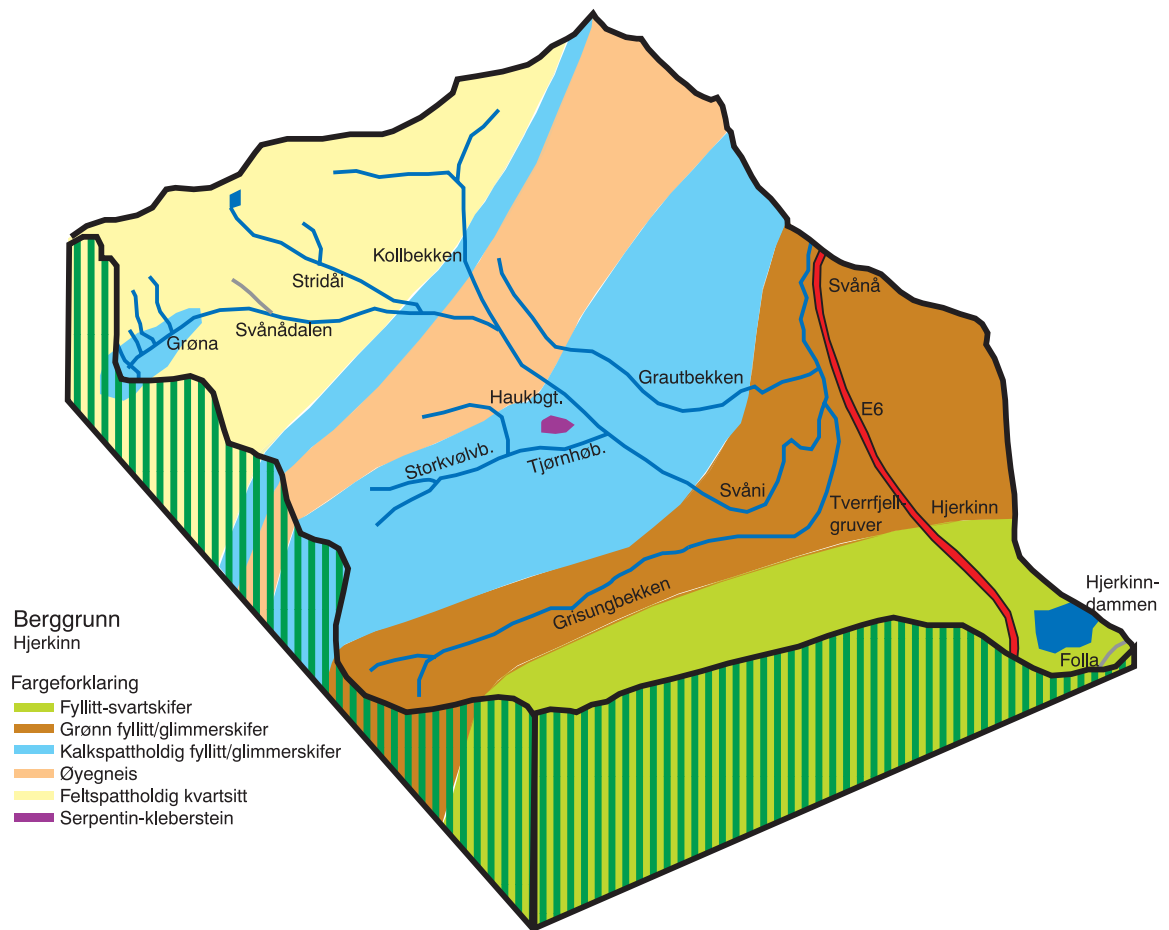
Hensikten med overvåkingen er å sikre en god dokumentasjon av vannkvaliteten i skytefeltets bekker og i grunnvannsutslaget fra deponiene i forbindelse med det planlagte anleggsarbeidet som skal tilbakeføre feltet til sivile formål.

Vannprøvene ble analysert med hensyn på metaller som observeres i høye konsentrasjoner i bekker som drenerer militære skytefelt (Rognerud og Bækken 2002), metaller som finnes i mindre mengder i militær ammunisjon (Rognerud et al. 2001), og vannkvalitetsvariable som påvirker metallers mobilitet, tilstandsform og giftighet (f.eks. pH, TOC, Ca). Tidligere har vi vist at konsentrasjonene av kvikksølv, kobber, bly og sink var såvidt lave at de ikke førte til gifteffekter på fisk og bunndyr (Rognerud 2003).

I denne rapporten har vi oppdatert den siste overvåkningsrapporten (Rognerud et al 2004) med resultatene fra vannkjemiske analyser i bekkene og i grunnvannsbrønnene på Storranden for perioden 2004 til 2006.



**Figur 1.** Oversikt over prøvestasjonene i Hjerfjell skytefelt i 2006



**Figur 2.** En forenklet fremstilling av geologien i feltet etter Nilsen og Wolff (1989)



## 2. Metoder

### 2.1 Innsamling

Vannprøvene for metallanalyser ble innsamlet på syrevaskede plastflasker, mens vannprøver for analyse av pH og TOC ble samlet inn på plastflasker. Det ble ikke tatt prøver ved alle stasjonene ved alle prøverundene. Vannprøvene fra grunnvannsbrønnene ble hentet opp med elektriske miljøpumper som ble senket ned i rørene. Det ble benyttet separate pumper og slanger for hver brønn.

### 2.2 Vannanalyser

Alle metallanalysene ble utført av SGAB Analytica (2001-2003) og NIVA (2004-2006). Alle analyser av pH og TOC er utført ved NIVAs laboratorium i Oslo. SGAB er akkreditert av SWEDAC og NIVA av Norsk Akkreditering (NA). Analysene av Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Si og Sr er utført ved hjelp av ICP-AES, mens Al, As, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sb og Zn ble analysert ved hjelp av ICP-SMS. pH og TOC ble analysert etter henholdsvis metode A1, og G 4-2 gitt i metodebeskrivelser ved NIVAs laboratorium. Fra og med 2004 er et mindre antall metaller analysert.

## 3. Resultater

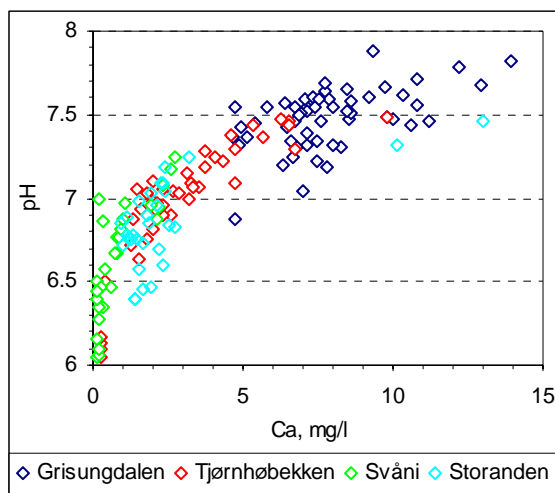
### 3.1 Vannanalyser i bekkene

Resultatene av alle vannanalysene (2004-2006) er gitt i vedlegget. Vi har valgt å presentere resultatene fra prøveseriene i følgende delområder: Grisungdalens bekker, Tjørnhøbekken, tilløpsbekkene til Svåni og bekkene fra demoleringsplassene. Svåni domineres av turbid brevann og resultatene diskuteres i et eget avsnitt sammen med resultatene fra bekkene som drenerer søppelplassene og resultatene fra grunnvannsbrønnene fra massetakene på Storranden.

#### 3.1.1 Viktige vannkvalitetsvariable for metallers mobilitet

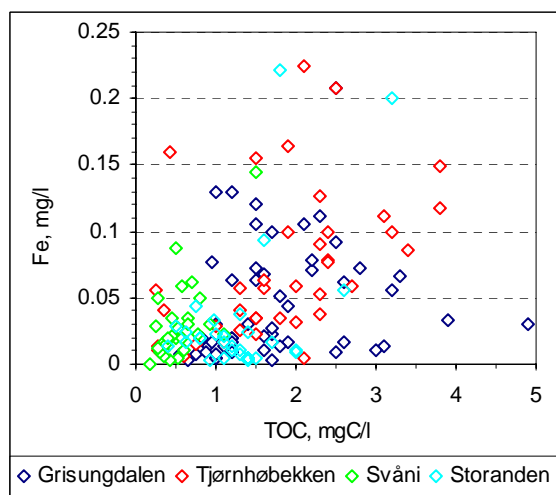
Utløsning av metaller fra berggrunn, løsavsetninger og korroderte prosjektilrester er til en stor grad avhengig av vannets pH-verdier, som i skytefeltets bekker i all hovedsak er styrt av forholdet mellom konsentrasjonene av bikarbonat ( $\text{HCO}_3$ ) og  $\text{CO}_2$ . I bekkene er konsentrasjonen av  $\text{CO}_2$  i nær likevekt med luftas  $\text{CO}_2$  og pH verdiene vil være styrt av bikarbonatkonsentrasjonen. Hovedkilden for bikarbonat i skytefeltets bekker er løsning av kalsiumkarbonat i grunnen. Det er derfor en god sammenheng mellom konsentrasjonene av kalsium og pH-verdiene i bekkene (Fig.3). Denne fremstillingsmåten er valgt fordi den viser nivåene av pH og kalsium som er svært viktig for metallers mobilitet i løsavsetningene og korrosjonshastigheten av deponerte prosjektilrester. Generelt sett er de fleste metaller mer mobile og metallrestene korroderer raskere i et surt enn i kalkfattig miljø. Geologien i skytefeltet er variert (Fig.2) og dette gir opphav til en stor variasjon i pH og kalsium-konsentrasjoner i de ulike delfeltene (Fig.3). Grisungdalen har kalkholdige bergarter som kalkspatholdig- og grønn fyllitt/glimmerskifer. Dette gjør at bekkene får svakt basisk reaksjon (pH 7-8) og generelt høye Ca konsentrasjoner (5-15 mg/l). Tjørnhøbekkens øvre deler drenerer områder bestående av kalkfattig øyegneis. Dette fører til at bekken har lave Ca konsentrasjoner og pH verdier nær 6, men begge øker betydelig når bekken renner gjennom det kalkspatholdige området på Haukberget. Svåni med tilløpselver drenerer områder som i hovedsak består av kvartsitt, gneis og områder med innslag av kalkspatholdig fyllitt. Dette gir lave Ca-konsentrasjoner og pH-verdier mellom 6 og 7. Nedbørfeltet til Storrandens bekker består av kalkspatholdig berggrunn overfylt av

store grusavsetninger som elver har tilført, fra gneis og kvartsitt-holdige områder, ved slutten av siste istid. Vannet i bekkene blir derfor noe kalkrikere enn Svånis tilløpsbekker. Bekkene som kommer ut av løsavsetningene på Storranden og i Grisungdalen samt grunnvannsbrønnene er antagelig overmettet av  $\text{CO}_2$ . Dette er antagelig årsaken til at pH var lavere enn pH ved de samme Ca-konsentrasjon i de godt utluftede bekkene (Fig.3).



**Figur 3.** Sammenhengen mellom kalsium-konsentrasjonen (Ca) og pH i bekkene i de ulike delfeltene.

Metallens mobilitet i løsavsetningene er også avhengig av konsentrasjonene av løst organisk stoff (TOC) og jernhydroksider (Fe). Disse stoffene binder løste metaller og gjør at de transporteres ut fra nedbørfeltet. Konsentrasjonene av disse "metall-transportørene" er lave i skytefeltets bekker og det var ingen samvariasjon mellom konsentrasjonene av disse variablene i noen av delfeltene (Fig.4)



**Figur 4.** Sammenhengen mellom konsentrasjonene av (TOC) og jern (Fe) i de ulike feltene.

Konsentrasjonene av As, Bi, Cd, Hg og Mo har i hele undersøkelsesperioden vært svært lave og oftest lavere enn deteksjongrensen for analysen. Det er derfor ikke knyttet forurensningsmessige sider til disse metallene og de diskuteres ikke videre i rapporten. Militære etterlavedenskaper inneholder også mindre mengder barium (Ba), strontium (Sr) og kobolt (Co). Vi har tidligere konkludert med at konsentrasjonene av disse metallene i bekkene er styrt av geokjemien i nedbørfeltet (Rognerud 2003). Denne konklusjonen bekreftes også av de senere observasjonene.

### 3.1.2 Alle delfelter unntatt Storranden og Svåni

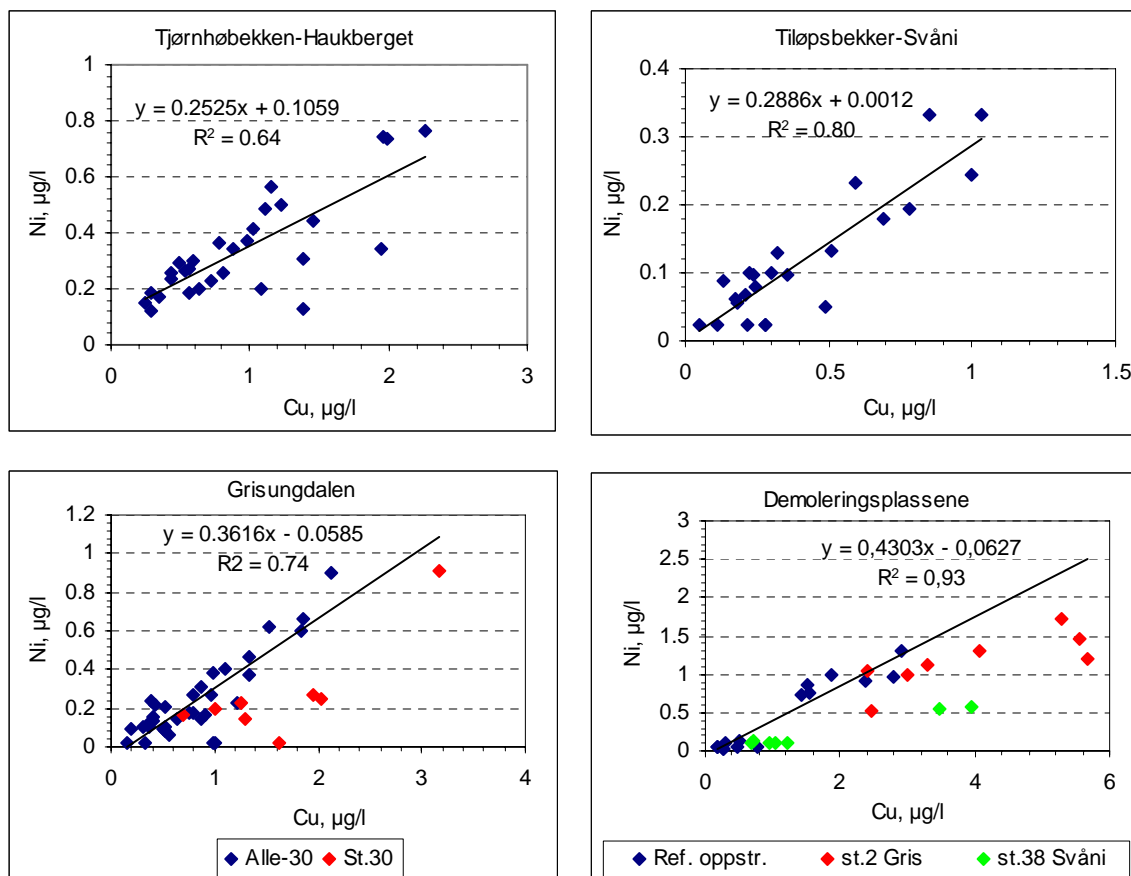
Militær håndvåpenammunisjon inneholder kobber, sink, bly og antimon, mens artillerigranater i hovedsak inneholder bl.a jern, aluminium, kobber og sink. Innholdet av metaller i flybomber er ukjent. Undersøkelsene i 2002 viste at den utkjørte gruvegrusen er anriket på kobber, sink og nikkel. Aluminium er et vanlig element i jordsmonnet og vi kan ikke skille forurensninger fra naturlig bidrag i bekkene (Rognerud 2003). Antimon forekommer i lave konsentrasjoner og svært ofte var verdiene lavere enn deteksjongrensen for analysen. Samvariasjonen mellom de øvrige metallene og de viktigste "metalltransportørene" i vann, organisk materiale og jern (jernhydroksider), er vist i Tab.1.

**Tabell 1.** Korrelasjonsmatrise mellom noen av de viktigste metallene samt organisk materiale (TOC) i tre nedbørfelt i Hjerkinnskytefelt (2002-2003). Uthevede verdier viser statistisk signifikante korrelasjoner på 95 % konfidensnivå.

	Tjørnhøbekken-Haukberget, n = 26					Grisungbekken m/tilløp, n = 28					Svåni's tilløpsbekker, n = 21				
	Fe	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Cu	Ni	Pb	Zn
TOC	0,3	<b>0,78</b>	<b>0,62</b>	0,29	<b>0,65</b>	0,2	<b>0,64</b>	<b>0,64</b>	0,07	<b>0,62</b>	0,45	<b>0,69</b>	<b>0,75</b>	0,29	0,18
Fe		0,2	0,17	0,15	0,22		0,37	0,04	0,18	<b>0,51</b>		0,36	<b>0,56</b>	0,1	0,01
Cu			<b>0,93</b>	0,38	<b>0,89</b>			<b>0,7</b>	0,18	<b>0,7</b>			<b>0,84</b>	0,18	0,42
Ni				0,08	<b>0,53</b>				0,1	0,39				0,16	0,3
Pb					0,3					0,31					0,41

Det var en god samvariasjon mellom konsentrasjonene av organisk materiale (TOC) og konsentrasjonene av kobber, nikkel og sink i alle delfeltene, unntatt for sink i Svåni's tilløpsbekker. Dette indikerer at humustoffer er en viktig "transportør" for disse elementene i bekkene. Det var en god samvariasjon mellom kobber, nikkel og sink i Tjørnhøbekkens nedbørfelt og i Grisungbekkens nedbørfelt, mens i Svåni's tilløpsbekker var det bare kobber og nikkel som viste en høy grad av samvariasjon. Det er bemerkelsesverdig at bly ikke var signifikant korrelert til verken TOC eller noen av metallene. Vi kommer tilbake til dette i diskusjonen.

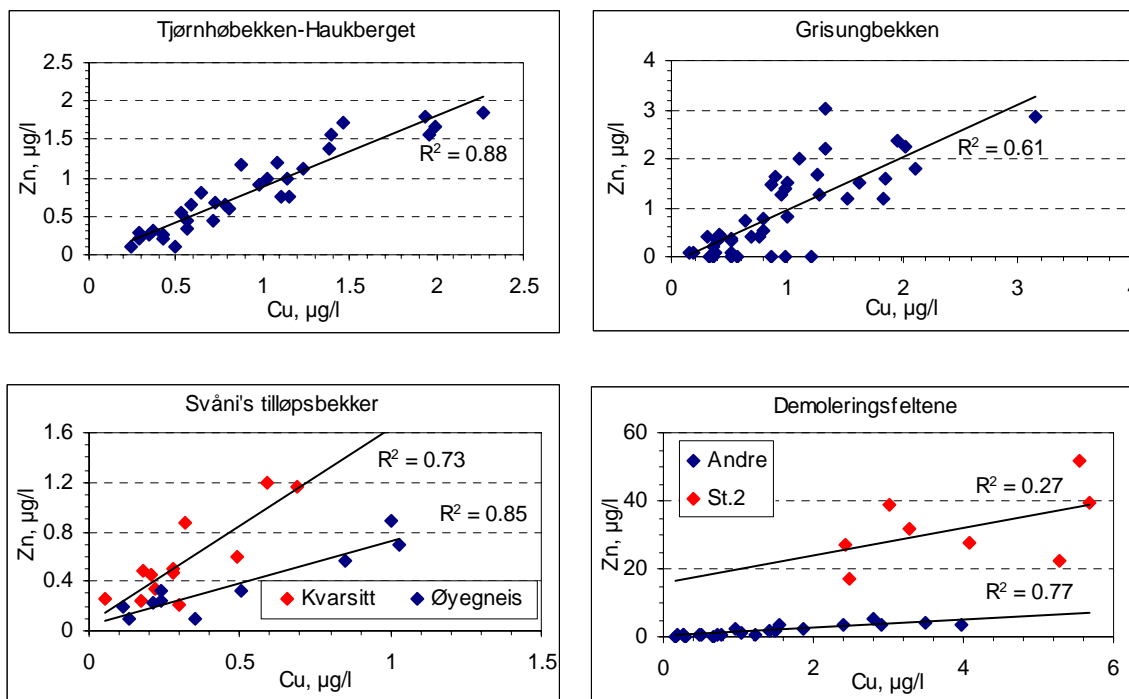
Den gode samvariasjonen mellom konsentrasjonene av kobber og nikkel i de fleste bekkene er oppsiktsvekkende. Militære etterlatenskaper (håndvåpen-prosjektiler, granater etc) inneholder kobber, men svært små mengder nikkel. Begge metallene er imidlertid anriket i gruvegrus (Rognerud 2003), og en samvariasjon kan forventes i bekkene som drenerer nedre deler av Haukberget og området nedstrøms HFK-sletta i Grisungdalen. Det var imidlertid ingen vesentlig forskjell på forholdet mellom konsentrasjonene av kobber og nikkel i bekker (3:1) fra disse områdene og fra områder der gruvegrusen ikke forekommer, selv om konsentrasjonene var høyere (Fig.5). Dette kan tyde på at geokjemien i området og gruvegrusen har nær det samme forholdet mellom disse metallene. Forholdet mellom kobber og nikkel var imidlertid noe høyere nedstrøms flyfeltet og demoleringsplassene. Dette indikerer at utsig fra kobberholdige prosjektilrester er en forurensningskilde i disse feltene (Fig.5).



**Figur 5.** Samvariasjonen mellom konsentrasjonene av kobber og nikkel i de ulike delfeltene. Regresjonslinjen for analysene i Grisungdalen er beregnet for alle data untatt st.30 (utløpet av flyfeltet), mens i demoleringsfeltene er stasjonen oppstrøms deponiet beregningsgrunnlaget.

Det var også en god samvariasjon mellom konsentrasjonene av kobber og sink i alle feltene, men bekkene nedstrøms demoleringsplassen i Grisungdalen som var betydelig mer anriket på sink enn de andre (Fig. 6). I Svånis tiløpsbekker var forholdet mellom kobber og sink lavere i de bekkene som drenerte kvarsittholdig berggrunn enn de som drenerte områder med øyegneis. Kobber og sink er bestanddeler i de fleste ammunisjonsrester, men samtidig er disse metallene også anriket i gruvegrus. Det er derfor ikke lett å skille mellom utlekking fra naturlig kilder, gruvegrus og korroderte prosjektiler når det gjelder sinkkonsentrasjoner i bekkene, med unntak av demoleringsplassen i Grisungdalen som helt klart er en betydelig sinkkilde (Fig.6).

På bakgrunn av denne gjennomgangen er det klart at bekkene i skytefeltet ikke er forurensset av bly. Vi kommer nærmere tilbake til årsakene til dette i diskusjonen. Videre er bekkene fra demoleringsplassene og flyfeltet forurensset av sink og kobber, mens nedre deler av Tjørnhøbekken, som påvirkes av avrenning fra Haukberget, er forurensset av nikkel, kobber og sink.

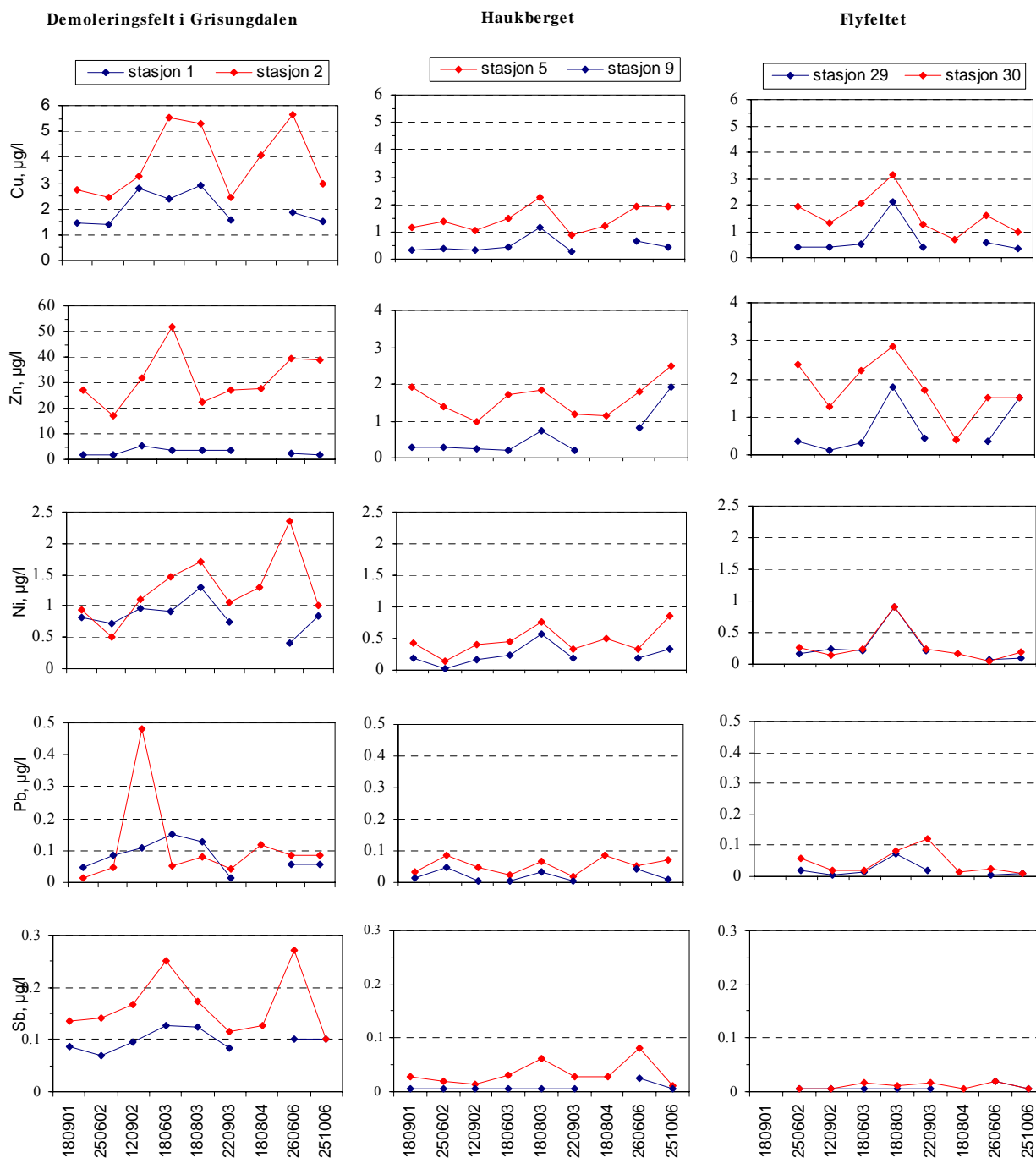


**Figur 6.** Samvariasjon mellom konsentrasjonene av kobber (Cu) og sink (Zn) i de ulike feltene. Regresjonslinjen for Svåni's tilløpsbekker representerer områder bestående av øyegneis, mens linjen for demoleringsfeltene er basert på alle data eksklusive data for st.2 (nedstrøms feltet i Grisungdalen).

### 3.1.3 Konsentrasjonsendringer av metaller i bekkene gjennom demoleringsfeltet i Grisungdalen, stridsvognfeltet på Haukberget og flyfeltet

Konsentrasjonene av kobber, sink, nikkel og antimon økte i bekkene gjennom demoleringsfeltet, men konsentrasjonene av bly var lavere enn oppstrøms deponiet ved alle tidspunkt, untatt i september 2002 da vannføringen var ekstremt lav (Fig. 7). Dette viser at deponiet er en klar forurensningskilde når det gjelder sink og kobber, men liten når det gjelder nikkel, antimon og bly. Det sistnevnte er overraskende tatt i betraktning de store mengder ammunisjon som er demolert på dette stedet. Det viser imidlertid at korrosjon av kobber/sink-holdige prosjektilrester er mer effektiv enn bly/antimon-holdige. Håndvåpen-ammunisjon inneholder 60 % bly og 7 % antimon, men i bekken fra deponiet var konsentrasjonene av antimon litt høyere enn bly. Dette viser at antimon er mer mobilt enn bly i deponiet.

I Tjørnhøbekken økte konsentrasjonene av kobber, sink, nikkel, bly og antimon på veien gjennom standplassområdene på Haukberget, mens i flyfeltet var det bare kobber og sink som økte (Fig. 7). Begge feltene hadde nær like konsentrasjoner av de ovennevnte metallene oppstrøms feltene. Dette er rimelig da begge feltene ligger i fylitt-området og skulle ha nær like naturgitte konsentrasjoner av metaller (Fig. 2). Det er imidlertid interessant at konsentrasjonene av nikkel, bly og antimon øker noe gjennom Haukberget og ikke i flyfeltet. Det er kjørt ut store mengder gruvegrus for oppbygging av kjøretraseer og blanderinger på Haukberget, men det er også deponert mye prosjektiler fra håndvåpen og mitraljøser, inneholdende kobber, sink, bly og antimon. I flyfeltet derimot er det ikke kjørt ut gruvegrus, og det brukes hovedsakelig som målområde for fly og artilleri. Disse prosjektilrestene inneholder kobber og sink, men ubetydelige mengder nikkel, bly og antimon. Gruvegrusen er anriket på kobber, sink og nikkel, men ikke bly og antimon (Rognerud 2003). Økningen i nikkel konsentrasjonene i Tjørnhøbekken indikerer derfor at gruvegrus må bidra til konsentrasjonsøkningen av nikkel og høyst sannsynlig også noe av økningen av kobber og sink. Likevel indikerer konsentrasjonsøkning av bly og antimon at det korroderer håndvåpenprosjektiler i feltet og at denne prosessen også høyst sannsynlig bidrar til økningen av kobber- og sinkkonsentrasjonene i bekken.



**Figur 7.** Konsentrasjoner av kobber (Cu), sink (Zn), nikkel (Ni), bly (Pb) og antimon (Sb) i bekkene fra tre viktige delområder i Hjerfoss skytefelt ved 9 ulike tidspunkt i perioden 2001-2006. Blå kurver er målepunktene oppstrøms feltene og rød nedstrøms.

### 3.1.4 Svåni og bekkene på Storranden

Svåni er påvirket av smeltevann fra breer i Snøhettaområdet og elva hadde turbid vann med høyt innhold av uorganisk materiale fra slutten av juni til begynnelsen av september. Dette betyr at de fleste

metaller er bundet i den uorganiske fraksjonen, indikert ved de høye konsentrasjonene av aluminium ved Maribu (st.28) oppstrøms skytefeltet (Tab.2). Selv om brevannet fortynnes noe nedover av tilrennende bekker i området ned mot Svånis utløp av feltet (st.15) viser aluminium-konsentrasjonene at vannkvaliteten var klart påvirket av brepartikler også ved denne stasjonen. Konsentrasjonen av metaller var lave og kobber var det eneste metallet som økte i konsentrasjon i Svåni gjennom feltet. Det er mulig at dette skyldes kobberforurensningene fra feltet, men på grunn av Svånis høye innhold av uorganisk materiale er dette svært usikkert. Avrenningen av metaller fra deponiene har generelt ingen nevneverdig betydning for vannkvaliteten i Svåni når den renner ut av feltet.

**Tabell 2.** Middelkonsentrasjoner av noen sentrale variable i Svåni (st.15, 28), og i bekker fra søppelplassene på Storranden (st.11, 60, og 62) samt i en dam uten avløp på Storranden (st.61).

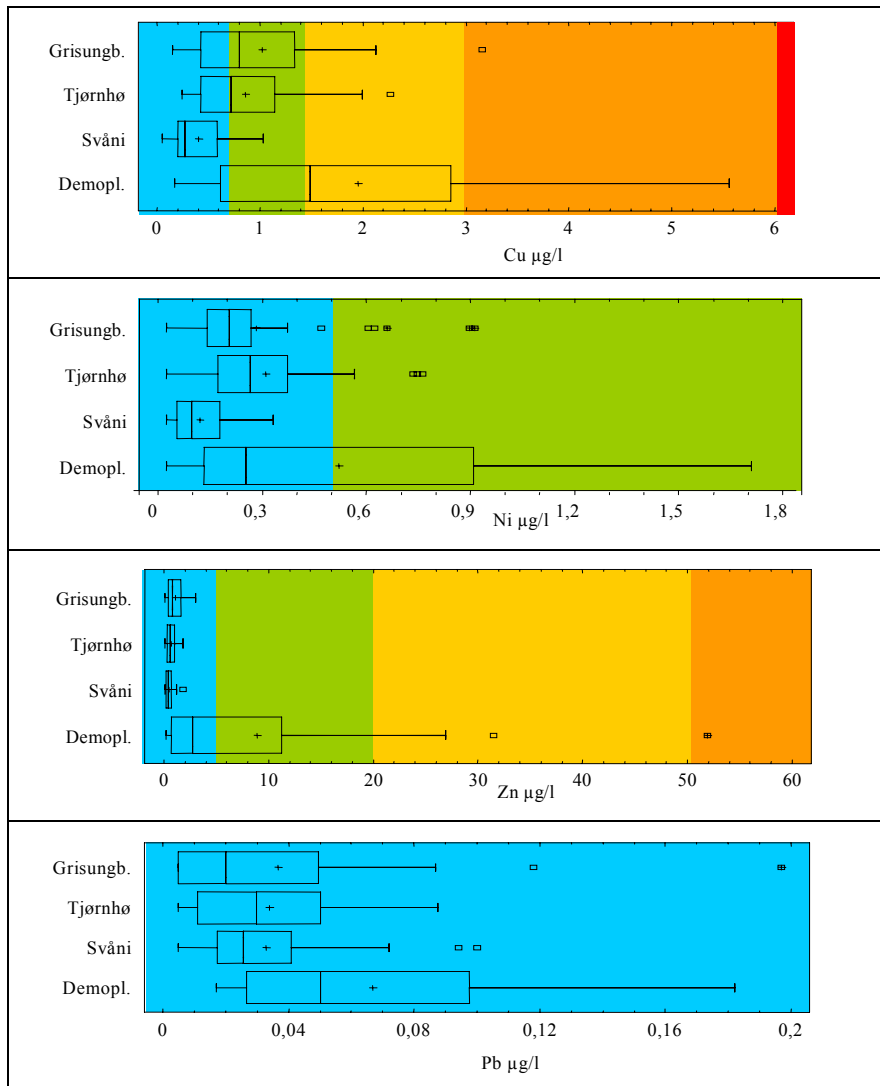
St.	pH	TOC mgC/l	Ca mg/l	Si mg/l	Fe µg/l	Al µg/l	Cd µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	P µg/l	Pb µg/l	Sb µg/l	Zn µg/l
15	6,82	0,72	0,84	1,32	29	50	0,001	0,59	0,2	2	0,050	0,010	0,64
28	6,24	0,32	0,3	1,04	70	255	0,002	0,33	0,23	4,1	0,101	0,080	0,9
11	6,48	1,63	1,63	2,98	5	36	0,001	0,83	0,22	0,7	0,022	0,017	0,53
60	6,65	0,95	2,3	3,38	15	14,4	0,001	0,7	0,25	0,5	0,024	0,017	0,65
61	6,87	1,3	2,16	2,68	9	73,5	0,535	18,9	1,27	1,1	0,007	0,052	86,5
62	6,9	1,3	2,55	3,1	17	22,5	0,001	0,87	0,36	0,8	0,007	0,007	0,8

Konsentrasjonene av metaller i bekker som antas å drenere den gamle overdekte søppelplassen (st.60), den nye åpne søppelplassen (st.11) og metall/ammunisjonsdeponiet (st.62) var alle lave (Tab.2). Søppelplassene og metalldeponiet ligger på et område med store løsavsetninger (grushauger) og det har ikke vært mulig å klarlegge om det er drens vannet fra disse plassene som kommer ut i de synlige bekkene der målingene er tatt. Hvis det er slik må korrosjonshastigheten av metaller i dette området være svært lave. De lave konsentrasjonene av organisk materiale (TOC) og jern, er en medvirkende årsak til at konsentrasjonene blir lave. Konsentrasjonene av sink, kobber, og aluminium var høye i dammen like ved metalldeponiet (st.61). Dammen har ikke synlig avløp og vannstandsvingninger sommerstid kan indikere at bunnen er tett, og at vannstanden bestemmes av balansen mellom nedbør og fordampning. På bunnen i dammen ligger metallrester av ulike typer og det er mulig at korrosjon av disse er hovedårsaken til de høye konsentrasjonene av de ovennevnte metallene.

### 3.1.5 Metallkonsentrasjoner og SFTs vannkvalitetskriterier i elver og bekker

En samlet oversikt over alle metallanalysene i delfeltene i lys av SFTs vannkvalitetskriterier viser at bekkene er ubetydelig forurensset av bly, lite til moderat av nikkel, sink og kobber, unntatt bekken fra demoleringsfeltet i Grisungdalen som er moderat til markert forurensset av kobber (Fig.8).

Det er episodisk enkelte høyere konsentrasjoner enn vanlig. Dette er atypiske verdier som blir registrert når vannføringen er spesielt lav og det kan skyldes at utlekkinger av metaller fra fyllinger av gruvegrus og metallrester i bekkefarene får økt innflytelse. Dette får imidlertid liten betydning for vannkvaliteten i Grisungbekken og Svåni på grunn av fortynningen av vann fra lite forurensede områder. Dersom en tar i betraktning de betydelige potensielle forurensningskildene i skytefeltet må forurensningsgraden i bekkene betegnes som overraskende lav.

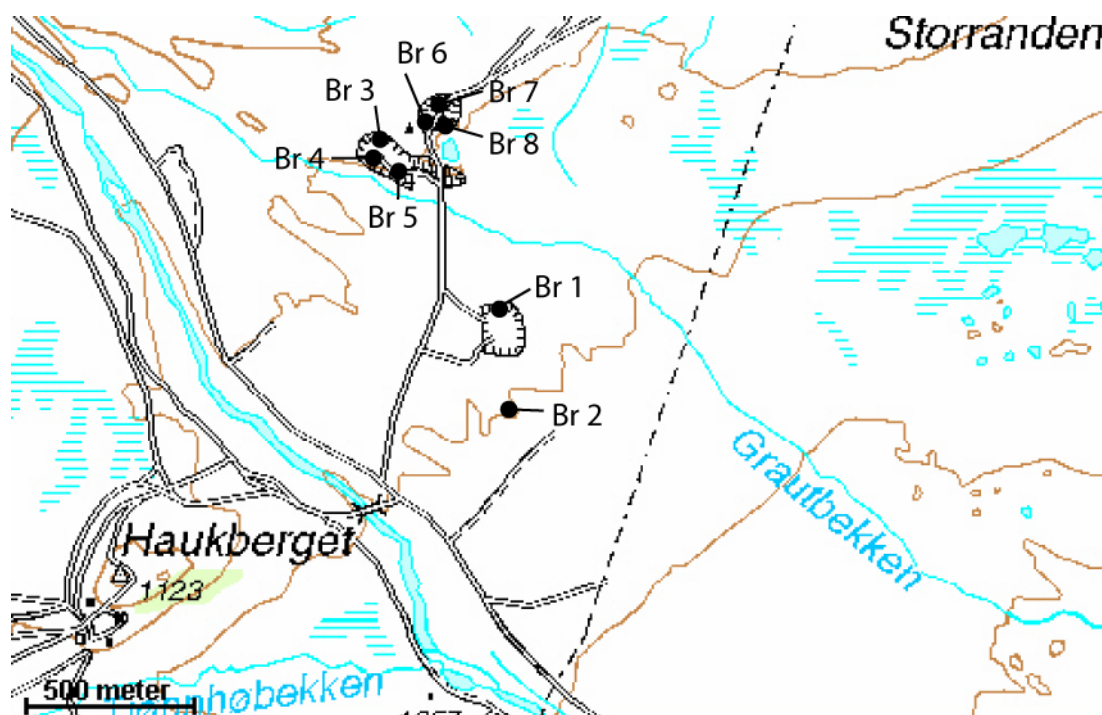


**Figur 8.** Boksplott for konsentrasjonene av de viktigste metallene i delfeltene (2002 og 2003). Boksene inkluderer 50 % av observasjonene, medianen er markert med strek og middelverdien med +. Linjene fra boksene er trukket til laveste og høyeste kvartil (25 til 75 % av observasjonene), mens observasjoner utenfor disse er markert med firkanter. Fargeangivelsene representerer SFTs tilstandsklasser for metaller i vann. Blå: ubetydelig forurensset, grønn: moderat forurensset, gul: markert forurensset, orange: sterkt forurensset og rød: meget sterkt forurensset.

### 3.2 Vannkvaliteten i grunnvannsbrønnene

Storranden er en gammel elveslette som inneholder store mengder grus og sand. De har vært benyttet som gruskilde i mange år og i noen av disse massetakene er det i dag tre deponier; M1, M2 og M3 (Forsvarsbygg 2006, 2007). M1 er et metalldeponi bestående av ammunisjonsrester (ca 1000 tonn), metallskrap og blindgjengere. M2 er en avsluttet (overdekt) eldre søppelplass som inneholder bl.a husholdningsavfall og 50 tonn ammunisjonsrester. M3 er en eldre søppelplass som til dels er åpen og inneholder ammunisjonsrester, metallskrap og delvis brent treavfall. I disse deponiene er det nedsatt 8 grunnvannsbrønner (Fig. 9) som er undersøkt i 2004 og 2006. Resultatene er gitt for utvalgte sentrale metaller i i tabell 3, og noen utvalgte samvariasjoner mellom metallene i figur 10. Primærdata er gitt i vedlegget.

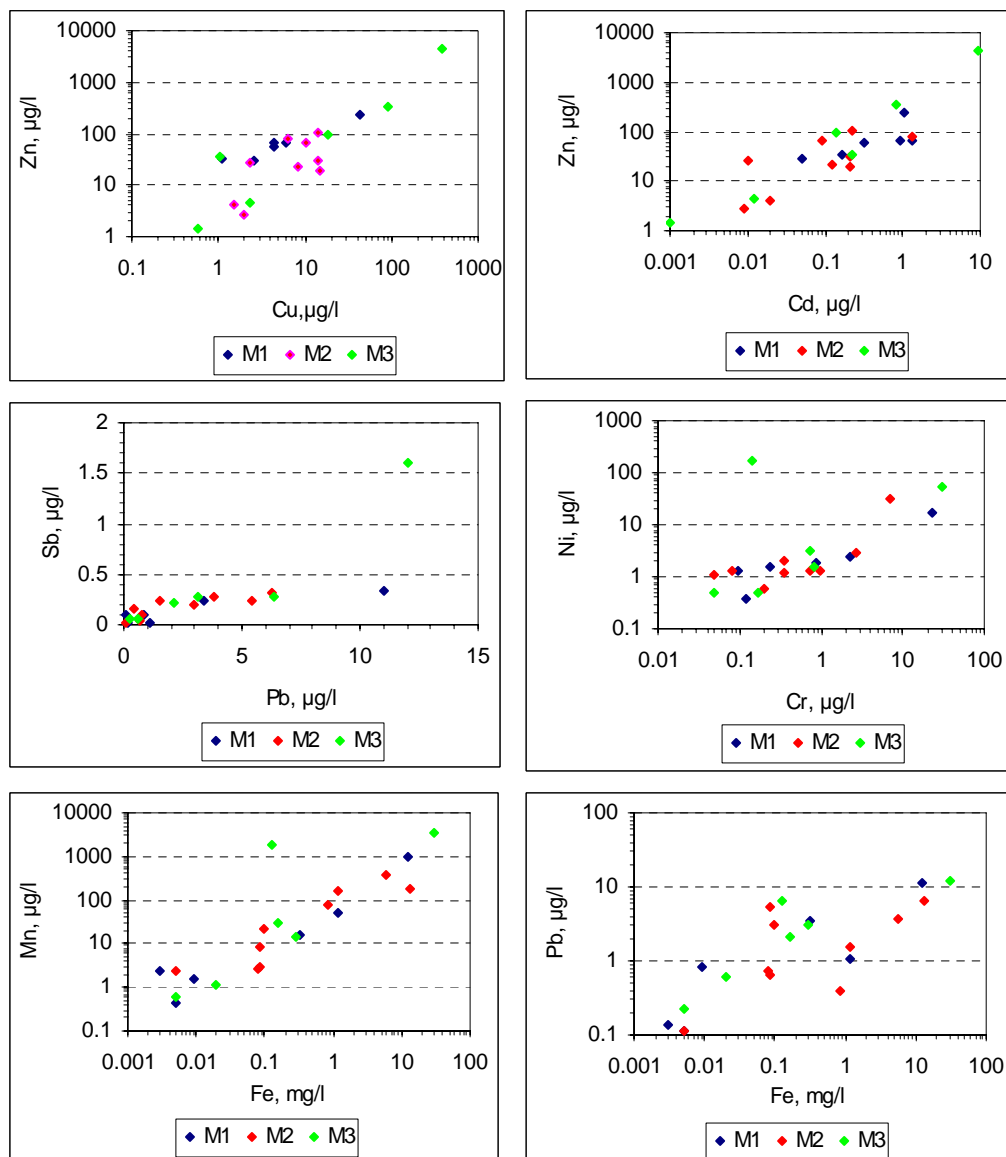




**Figur 9.** Lokalisering av grunnvannsbrønner på Storranden. Brønn 1 og 2 ligger i massetak (M1), brønn 3, 4 og 5 i M2 og brønn 6, 7 og 8 i M3.

**Tabell 3.** Konsentrasjoner av metaller i grunnvannsbrønnene på Storranden. Målinger merket rødt er konsentrasjoner i tilstandsklasse V "meget sterkt forurensset" i SFTs klassifisering av metaller målt i vann.

st	dato	pH	TOC mg/l	Ca mg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Fe µg/l	Mn µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Sb µg/l	Zn µg/l
br.1	18.08.2004	6.69	0.47	3.28	1.35	0.1	5.93	3	2.36	1.27	0.14	0.023	66.9
br.1	26.06.2006			3.52	1.07	23.4	43.1	12300	1000	16.8	11	0.33	243
br.1	25.10.2006	7.17	0.56	2.6	0.92	0.24	4.4	8.9	1.5	1.6	0.84	0.1	65
br.2	18.08.2004	6.78	0.69	3.31	0.319	2.25	4.37	1150	52.7	2.38	1.06	0.019	57.8
br.2	26.06.2006			5.18	0.05	0.88	2.59	320	15.7	1.8	3.38	0.24	29.4
br.2	25.10.2006	7.31	0.54	2.6	0.17	0.12	1.1	5.4	0.45	0.37	0.11	0.1	33
br.3	18.08.2004	6.42	5.6	4.09	0.217	0.99	13.8	5720	384	1.29	3.81	0.272	104
br.3	26.06.2006			2.49	0.01	0.2	2.34	84	2.93	0.6	5.45	0.23	26.2
br.3	25.10.2006			1.8	0.12	2.7	8.1	1200	160	3	1.5	0.23	22
br.4	18.08.2004	7.17	3.2	34.9	0.209	0.08	14.6	862	78.8	1.25	0.4	0.159	19.2
br.4	26.06.2006	5.9	2	1.36	0.09	0.36	10.1	100	21	2	2.99	0.2	66.2
br.4	25.10.2006	7.86	2.4	28	0.21	6.9	14	13000	180	32	6.3	0.31	30
br.5	18.08.2004	7.23	0.26	5.64	0.009	0.34	2.02	87	8.11	1.15	0.66	0.038	2.77
br.5	26.06.2006	6.68	0.62	3.01	1.3	0.05	6.38	5	2.46	1.1	0.11	0.02	76.8
br.5	25.10.2006	7.69	0.24	5.1	0.02	0.74	1.5	82	2.7	1.3	0.75	0.1	4
br.6	26.06.2006	6.86	0.67	2.56	0.22	0.05	1.04	5	0.63	0.48	0.23	0.05	34.3
br.6	25.10.2006	6.78	6.5	6.4	0.84	30	93	30000	3400	55	12	1.6	340
br.7	18.08.2004	7.15	0.27	4.07	0.001	0.17	0.59	20	1.11	0.486	0.62	0.065	1.44
br.7	25.10.2006	7.38	0.2	2.7	0.012	0.83	2.3	290	14	1.6	3.1	0.27	4.6
br.8	18.08.2004	6.25	0.56	163	9.2	0.14	379	129	1830	166	6.35	0.277	4500
br.8	25.10.2006	6.65	2.1	2	0.14	0.72	18	160	30	3.1	2.1	0.22	100



**Figur 10.** Spredningsdiagram over samvariasjon mellom utvalgte metaller i alle grunnvannsbrønnene i de tre massetakene M1, M2 og M3 på Storranden.

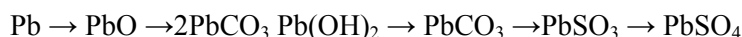
Generelt var det stor spredning i konsentrasjonene av metaller i brønnen i de tre massetakene. Særlig gjalt dette for de redokssensitive elementene jern og mangan. Dette kan indikere at det skjer en veksling mellom reduktivt og oksidativt miljø i massetakene avhengig av vanngjennomstrømningen. Det var også en relativt god samvariasjon mellom de fleste av metallene. Sink samvarierte med kobber og kadmium, krom med nikkel og bly med antimon. Konsentrasjonene av TOC var lave (Tab.3) og jern og mangan oksider kan være viktige transportører av metaller ut fra deponiet slik som vist for bly.

## 4. Diskusjon

Hjerkinn skytefelt er tilført betydelige mengder metaller som følge av bruk av handvåpen, artilleri, bombekastere, stridsvogner, rakettartilleri og fly. Det er beregnet at ca. 770 tonn kobber, 250 tonn bly, 30 tonn antimon og 22 tonn sink samt mindre mengder andre metaller er deponert i skytefeltet (Roseth et al. 2003). Til tross for disse betydelige deponiene av metaller er konsentrasjonene i bekkene overraskende lave. Unntaket er bekken fra demoleringsplassen i Grisungdalen som er moderat til markert forurensset av kobber, sink og nikkel. Konsentrasjonene av bly, sink og nikkel i skytefeltets bekker er på nivå med det som vanligvis observeres i norske vannforekomster (data i Skjelkvåle et al. 1999), men kobberverdiene er noe høyere antagelig som følge av utlekking fra gruvegrus og korroderte prosjektilrester. Det er imidlertid spesielt oppsiktsvekkende at alle bekkene er ubetydelig forurensset av bly. Dette elementet er ett av SFTs prioriterte metaller og et av tre metaller som er gjenstand for internasjonale avtaler om utslippsreduksjoner.

Vi skal først se nærmere på hva som kan være årsakene til at 250 tonn deponert bly ikke forurenser bekkene.

Når elementært bly (Pb), slik det foreligger i prosjektilrester, blir eksponert for oksygen dannes det etterhvert et tynt beskyttende grått lag (patina) av lite løselige blysalter på metalloverflaten. Dannelsen av disse saltene kan beskrives på følgende måte (Black and Allen 1999).



Kort beskrevet kan vi si at metallisk bly reagerer med oksygen og det dannes blyoksid som reagerer med CO<sub>2</sub> i et fuktig miljø og det dannes et lag av basisk blykarbonat, hydrocerusitt (PbCO<sub>3</sub> Pb(OH)<sub>2</sub>) som ved videre eksponering av CO<sub>2</sub> omdannes til vanlig blykarbonat, cerusitt (PbCO<sub>3</sub>). Ved nærvær av svoveldioksid omdannes patinaen til blyulfitt som videre oksideres til blyulfat. Det er derfor vanlig å observere at patina på metallisk bly eksponert for luft etter en tid består nesten utelukkende av blyulfat (Black and Allen 1999).

Metallisk bly fra prosjektilrester som er skutt inn i jordsmonnet vil etter en tid bli omgitt av et lag eller skorpe som i hovedsak består av blyulfat og blykarbonater. I et nær nøytralt til svakt basisk miljø, slik det er i de viktigste deponiområdene i Hjerkinn skytefelt, vil disse blyforbindelsene være svært lite løselig og skorpedannelsen vil effektivt beskytte blyfragmentene for videre tilgang på oksygen. Resultatet er at korrosjonshastigheten reduseres til et meget lavt nivå (eventuelt stanser opp) etter den første skorpedannelsen, og sjansen for utlekkingen av løste blyforbindelser fra prosjektilrestene vil bli redusert til et minimum sålenge skorpelaget ikke blir ødelagt ved forsyrelser av deponiet. Dette er en av de viktigste årsakene til de lave blykonsentrasjonene i skytefeltets bekker, men det er også flere.

Det er rimelig å anta at blyioner, særlig i den første oksidasjonsfasen, vil kunne tilføres markvannet. I et nøytralt til svakt basisk miljø er imidlertid bindingskapasiteten for blyioner i jorda svært sterk og sjansen for at de kommer ut i åpne bekker er svært liten (Sauve et al. 2000). Det er spesielt tilstedeværelsen av mineraler som apatitt, Mn-oksider, Fe-oksider og Al-oksider som gjør at blyioner bindes effektive i jorda, men organisk materiale i humussjiktet er også en viktig kompleksbinder (Chen et al. 1997, Reilly et al. 2003). Tilstedeværelsen av apatitt vil kunne føre til dannelsen av blyfosfater (f.eks pyromorfitt, Pb<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Cl) som i størrelsesorden er 44 ganger mindre løselig og betydelig mer geokjemisk stabil over et langt større pH-område enn blyoksider, blyulfater og blykarbonater (Traina and Laperche 1999). Mineralgruppen apatitt (f.eks. hydroksylapatitt, Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>OH) er den vanligste fosformineralgruppen i jord og blant de mest stabile mineralgrupper i nøytral til alkalisk miljø (Traina and Laperche 1999). Disse forfatterene har vist at tilstedeværelsen av apatitt kan føre til at blysalter og bly adsorbert til metalloksider løses, og at det dannes nesten uløselige

blyforbindelser i form av ulike forbindelser innen pyromorfitt-gruppen ( $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$ ) på følgende måte:



Denne reaksjonsligningen viser at utfellingen av pyromorfitt raskt vil redusere konsentrasjonen av løst Pb. Tilsetningen av apatitt til blyforurenset jord har derfor vært benyttet som et effektivt tiltak for å redusere biotilgjengeligheten av bly i jordsmonnet (Laperche et al. 1997). Apatitt finnes i alle landets sedimentære bergarter som bærer av det nødvendige fosforinnhold for plantevekst (Neumann 1985). I skytefeltet er metamorfe sedimentære bergarter (og løsavsetninger dannet av disse) vanlig, og apatitt er derfor et viktig mineral som påvirker blyets mobilitet i nedbørfeltet. De reaksjonsprodukter som dannes mellom løste bly-ioner og apatitt avhenger av løsningsens pH-verdier (Chen et al. 1997). I Hjerkinns skytefelt har vannet i de områdene som er mest belastet med blyholdige prosjektiler en nær nøytral til svakt basisk reaksjon. I et slik miljø har Chen et al. (1997) vist at løst  $\text{Pb}^{2+}$  kan reagere med apatitt og danne svært lite løselige forbindelser slik som hydrocerusitt ( $\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ) og flere bly-fosforforbindelser som hydrokso- og fluoro-pyromorfitt,  $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F})$  og karbonerte hydrokso fluoro-pyromorfitt ( $\text{Pb}_5(\text{PO}_4\text{CO}_3)_3(\text{OH},\text{F})$ ). Alle disse reaksjonsproduktene er nesten uløselig og de bidrar til at løste blyioner svært sjelden når bekkene i skytefeltet. Det er imidlertid også rimelig å forvente at en del bly bindes til metalloksider og organisk materiale i jorda, men bindingstyrken er ikke så sterk for disse forbindelsene som hos de ovennevnte pyromorfitt-forbindelsene (Sauve et al. 2003). Det er derfor rimelig å anta at bly i bekkene er bundet i eroderte blymineraler fra nedbørfeltet, enten naturlig forekommende (f.eks i feltspat, Swain 1978) eller som mineraler dannet ved korrosjon av prosjektilrester. Dette stemmer godt overens med at blykonsentrasjonene i bekkene ikke samvarierte signifikant med konsentrasjonene av organisk materiale (TOC) og jernoksider (Fe).

Konsentrasjonene av kobber var langt høyere enn bly og konsentrasjoner opp mot 2-3  $\mu\text{g/l}$  (tilsvarende SFTs tilstandsklasse II og III) ble observert i bekkene fra demoleringsfeltene, nedstrøms Haukberget og nedstrøms flyfeltet. Konsentrasjonene av kobber samvarierte godt med nikkel og sink i alle delfeltene. Gruvegrus er anriket på disse metallene (Rognerud 2003) og en samvariasjon kan forventes i bekker som påvirkes av avrenning fra områder der denne finnes, men samvariasjonen var også god på stasjonene som ikke påvirkes av gruvegrus. Dette indikerer en samvariasjon også i den naturgitte geokjemien. I bekkene fra demoleringsplassene og i bekken fra flyfeltet er korrosjon av prosjektiler en årsak til de økte kobber og sink-konsentrasjonene (Grisungdalen). I motsetning til bly dannes det vanligvis ikke signifikante mengder av kobbersalter med nitrat, sulfat eller klorid i vann, men organisk materiale i form av løste humus- og fulvosyrer danner stabile komplekser med løst kobber ved relativt lave konsentrasjoner (Kabata-Pendias og Pendias 1984, Sauve et al. 2003). Derfor er løste organiske kobberforbindelser den viktigste kobberforbindelsen i vann over et stort intervall i pH-verdier (McBride and Blisak 1979, Sauve et al. 2000). Dette stemmer godt overens med våre resultater der konsentrasjonene av kobber samvarierte signifikant med løst organisk materiale (TOC). Bindingen til ”metalltransportøren” løst organisk materiale og dannelsen av en lite stabil skorpe av kobbersalter på metallrestene er hovedårsaken til at kobber er mer mobilt enn bly i skytefeltet.

I motsetning til mange andre tungmetaller mobiliseres sink relativt lett i jordsmonnet. Løseligheten er større i et surt enn i et basisk miljø og konsentrasjonene av sink er generelt negativt korrelert til kalsiumkonsentrasjonene (Tarvainen et al. 1997, Kabata-Pendias and Pendias 1984). Generelt sett er sink svakt korrelert til TOC i overflatevann i Skandinavia (Lydersen et al. 2002), men i et svakt basisk miljø kan andelen av løste organiske sinkforbindelser være betydelig og dette kan være en viktig faktor som gjør at sink også løses ut i betydelig grad også i et slikt miljø (Kabata-Pendias og Pendias 1984). Nikkel har også større løselighet i et surt enn i et basisk miljø, men organisk materiale har en stor evne til å binde løste nikkel-ioner (Kabata-Pendias and Pendias 1984). I regionale undersøkelser er det observert gode sammenhenger mellom konsentrasjoner av nikkel og TOC (Mannio et al. 1995, Tarvainen et al. 1997). Dette stemmer godt overens med våre resultater som viser at konsentrasjonene av sink og nikkel samvarierte signifikant med løst organisk materiale (TOC).

Det er derfor klart at i de mest brukte områdene i Hjerkinns skytefelt er de relativt kalkrike bergartene og løsavsetningene, med et nøytralt til alkalisk miljø i vannfasen, hovedårsaken til at bekkene er lite til moderat forurensset av metaller. Det er imidlertid også andre forhold som er medvirkende til dette. Hjerkinns skytefelt ligger i regnskyggen fra fjellene i vest og har lave nedbørsmengder, tynt humusdekke og lave temperaturer store deler av året. De lave konsentrasjonene av løst organisk materiale (TOC) i Hjerkinns bekker skyldes lav nedbrytning av organisk materiale i jorden som følge av lite nedbør og lav temperatur. De stedvise høye kalsiumkonsentrasjonene i feltet fører til utfelling (koagulering) av løste humusforbindelser. Dette er også en medvirkende årsak til de lave TOC konsentrasjonene i bekkene. Dette er forhold som bidrar til at konsentrasjonene ikke er spesielt høye for kobber og sink til tross for betydelige deponier i skytefelt. Dette er i god overensstemmelse med resultatene fra flere nordnorske skytefelt som har lignende naturgitte forhold som Hjerkinns (Rognerud 2003).

Storranden er en løsmasseforekomst som inneholder store mengder sortert materiale og et betydelig grunnvannsmagasin (Forsvarsbygg 2006). Oppholdstiden av vann i magasinet er imidlertid til tider kort og dette er sannsynligvis årsaken til de store variasjonene i konsentrasjoner av metaller som er målt i grunnvannsbrønnene. Brønnene er plassert slik at det er øvre del av grunnvannsmagasinet som blir prøvetatt, og det er her det forventes størst effekt fra utlekkingen av deponiene (Forsvarsbygg 2006). Varierende oppholdstid i grunnvannsmagasinet gjennom året og veksling mellom reduktivt og oksidativt miljø i deponiet er årsaken til de store variasjonene i metallkonsentrasjonene i brønnene. Likvel viser tidligere målinger i små bekker som starter i grunnvannsutslagene i forkant av løsmasseviften generelt lave metall konsentrasjoner (Rognerud et al 2004). Brønnene står i eller svært nær deponiene. Det er derfor rimelig å anta at tidvis høye konsentrasjoner av metallene i brønnene skjer i perioder med liten vanngjennomstrømning og at dette ikke er av stor betydning når grunnvannet fra magasinet slår ut i dagen nedstrøm løsmasseviften.

## 5. Litteratur

- Black, L. and Allen G. C. 1999. Nature of lead patination. *Brit. Corr. J.* 34: 192-197.
- Chen, X., Wright, J. V., Conca, J L., and Peurrung, L.M. 1997. *Water Air Soil Pollut.* 98, 57-78.
- Chen, X., Wright, J. V., Conca, J L., and Peurrung, L.M. 1997. Effects of pH on heavy metal sorption on mineral apatite. *Environ. Sci. Technol.* 31, 624-631.
- Forsvarsbygg 2006. Hjerkinns PRO-Tilbakeføring av Hjerkinns skytefelt til sivile formål. Søknad om tiltak mot grunn- og vannforurensning. 36 s.
- Forsvarsbygg 2007. Hjerkinns PRO – Tilbakeføring av Hjerkinns skytefelt til sivile formål. Revidert søknad om tiltak mot grunn- og vannforurensning. 9 s.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. 1984. Trace elements in soil and plants. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. 315 p.
- Laperche, V., Logan, T. J., Gaddam, P. and Traina, S.J. 1997. *Environ. Sci. Technol.* 31, 2745-2753.

- Lydersen, E., Løfgren, S. and Arnesen R.T. 2002. Metals in Scandinavian surface waters: Effects of acidification, liming and potential reacidification. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.* 32: Issue 2 and 3. 295p.
- Mannio, J., Jarvinen, O., Tuominen, R. and Verta, M. 1995. Survey of trace elements in lake waters of Finnish Lapland using the ICP-MS technique. *Sci Tot. Environ.*, 160/161, 433-439.
- McBride, M. B., and Blasiak, J.J. 1979. Zinc and copper solubility as a function of pH in acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*: 43, 866-880.
- Naumann, H. 1985. Norges mineraler. NGU-skrifter 68. Universitetsforlaget, Oslo. 278 s.
- Nilsen, O. og Wolff, F. C. 1989. Geologisk kart over Norge, berggrunnskart Røros & Sveg-1:250 000. Norges Geologiske undersøkelse.
- O'Reilly, S. E. and Hochella, M.F. 2003. Lead sorption efficiencies of natural and synthetic Mn and Fe-oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 67: 4471-4487.
- Rognerud, S. 2002. Hjerkinns skytefelt. Konsentrasjoner av metaller i vannprøver innsamlet fra 20 bekker, 18 september 2001. NIVA-rapport LNR 4519-2002.
- Rognerud, S. 2003. Hjerkinns skytefelt 2002. Vannkvalitet og forurensningsgrad av metaller i vann og biota. NIVA-rapport LNR 4623-2003.
- Rognerud, S., Eli-Anne Lindstrøm, Ståvi, J. M. 2004. Vannkvalitet, forurensningsgrad av metaller og tiltaksplan mot forurensninger. NIVA-rapport 4781-2004.
- Roseth, A., et al. 2003. Forsvarets bruk av Hjerkinns skytefelt i perioden 1923 - 2003. Forsvarets etterlatenskaper av farlig karakter. Blindgjengere og eksplosivrester. FLO/Land/Våpensystemavdelingen.
- Sauve, S., Hendershot, W., and Allen, H. E. 2000. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 34: 1125-1131.
- Sauve, S., Manna, S., Turmel, M-C., Roy, A.G. and Courchesne, F. 2003. Solid-Solution partitioning of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn in the organic horizons of a forest soil. *Environ. Sci. Technol.* 37: 5191-5196.
- Skjelkvåle, B. L. et al. 1999. Heavy metal surveys in Nordic lakes, harmonised data for regional assessment of critical limits. SNO-report 4039-99. 73 sider.
- Stumm, W. and Morgan, J. J. 1970. *Aquatic Chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters.* Wiley-Interscience, New York. 583p.
- Swaine, D.J. 1978. Lead in the environment. *J. Proc. Royal Soc. New South Wales.* 111: 41-47.
- Tarvainen, T., Lahermo, P., and Mannio, J. 1997. Sources of trace metals in streams and headwater lakes in Finland. *Water Air Soil Pollut.*, 94, 1-32.
- Traina, S.J. and Laperche, V. 1999. Contaminant bioavailability in soils, sediments, and aquatic environments. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96: 3365-3371.

## 6. Vedlegg

Tabell 1. Analyseresultatene for Hjerkins skytefelt 18.08.2004.

St.	pH	TOC mg/l	Ca mg/l	Fe mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	S mg/l	Si mg/l	Al µg/l	As µg/l	Ba µg/l	Bi µg/l	Cd µg/l	Co µg/l	Cr µg/l
2	7.48	2.5	9.83	0.208	1.94	1.03	1.31	2.23	3.69	12.6	<0.05	10.2	<0.05	0.088	0.124	0.11
5	7.14	2.6	3.78	0.28	0.83	0.75	1.38	0.8	2.94	31	<0.05	7.03	<0.05	0.005	0.101	0.129
6	7.09	2.6	3.26	0.207	0.73	0.68	1.35	0.83	2.95	25.6	<0.05	6.4	<0.05	0.003	0.096	0.125
11	6.73	1.7	1.64	0.017	0.61	0.42	1.24	0.39	3.12	67.4	<0.05	7.62	<0.05	0.001	0.026	0.093
15	6.78	0.4	1.36	0.013	0.2	0.26	0.69	0.55	1.41	7.12	<0.05	9.31	<0.05	0.001	0.013	0.091
17	7.39	1.2	7.12	0.009	1.04	1.28	1.08	1.24	2.12	18	<0.05	7.24	<0.05	0.006	0.021	0.185
18	7.44	0.78	10.6	0.71	1.62	2.71	1.17	0.56	1.12	6.68	<0.05	9.58	<0.05	0.023	0.047	0.072
26	7.29	1.6	6.7	0.064	1.32	0.91	1.47	1.66	3.3	8.28	<0.05	6.62	<0.05	0.004	0.019	0.123
30	7.58	1	8.57	0.03	1.16	1.52	1.13	1.21	2.44	5.28	<0.05	5.31	<0.05	0.007	0.008	0.121
38	6.82	1.5	0.95	0.145	0.2	0.29	1.06	0.18	3.28	18.1	<0.05	14.1	<0.05	0.044	0.034	0.121
61	5.57	0.56	2.93	0.02	0.92	0.89	1.2	4.33	3.47	645	<0.05	23.2	<0.05	2.16	3.54	0.48
br.1	6.69	0.47	3.28	0.003	0.75	0.74	1.04	2.54	2.99	9.63	<0.05	13.5	<0.05	1.35	0.196	0.097
br.2	6.78	0.69	3.31	1.15	0.95	0.94	1.14	1.67	4.07	757	0.15	40.4	<0.05	0.319	1.69	2.25
br.3	6.42	5.6	4.09	5.72	1.66	0.8	1.51	0.49	3.42	1590	0.49	76.3	<0.05	0.217	5.11	0.991
br.4	7.17	3.2	34.9	0.862	12.2	8.74	8.24	3.97	3.44	15.8	0.27	157	<0.05	0.209	0.54	0.082
br.5	7.23	0.26	5.64	0.087	2.07	1.39	2.67	2.56	6.57	67.2	<0.05	15	<0.05	0.009	0.34	0.344
br.7	7.15	0.27	4.07	0.02	1.77	1.03	2.08	1.54	5.89	13.1	<0.05	5.69	<0.05	0.001	0.095	0.169
br.8	6.25	0.56	163	0.129	11.6	56.2	5.39	210	10	379	<0.07	19.2	<0.05	9.2	140	0.144

St.	Cu µg/l	Mn µg/l	Mo µg/l	Ni µg/l	P µg/l	Pb µg/l	Sb µg/l	Sr µg/l	Zn µg/l
2	4.08	6.48	0.082	1.3	1.59	0.116	0.126	19	27.7
5	1.23	10.6	0.081	0.497	1.79	0.084	0.027	15.3	1.13
6	1.11	9.39	0.081	0.487	1.17	0.053	0.026	13.9	0.749
11	0.958	0.517	<0.05	0.235	3.09	0.063	0.026	8.48	0.75
15	0.663	0.697	<0.05	0.279	1.26	0.067	0.015	6.67	0.742
17	0.984	0.636	0.145	0.386	<1	0.08	0.012	15.7	1.4
18	1.21	8.42	<0.05	0.228	4.39	0.048	0.014	20	1.01
26	0.754	3.04	0.164	0.277	<1	0.069	0.017	18.8	0.571
30	0.69	1.08	0.168	0.164	<1	0.015	<0.01	18	0.41
38	3.48	1.66	<0.05	0.543	1.79	0.707	0.054	6.36	4.28
61	159	38.7	<0.05	4.2	<1	0.301	0.041	13.5	355
br.1	5.93	2.36	<0.05	1.27	<1	0.139	0.023	13.3	66.9
br.2	4.37	52.7	0.103	2.38	67.9	1.06	0.019	15.3	57.8
br.3	13.8	384	0.166	1.29	360	3.81	0.272	17.8	104
br.4	14.6	78.8	0.094	1.25	14.1	0.396	0.159	165	19.2
br.5	2.02	8.11	0.379	1.15	18.4	0.655	0.038	16.9	2.77
br.7	0.587	1.11	0.202	0.486	1.62	0.623	0.065	14.5	1.44
br.8	379	1830	0.068	166	14.8	6.35	0.277	298	4500

Tabell 2. Analyseresultater fra Hjerkinnskytefelt 26.06.2006

st	pH	TOC mg/l	Ca mg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Fe mg/l	Mn µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Sb µg/l	Zn µg/l
1	7.27	3	6.67	0.01	0.1	1.87	0.001	0.4	1	0.056	0.1	2.25
2	7.46	2.6	6.72	0.14	<0.1	5.67	0.061	2.35	1.2	0.083	0.27	39.2
5	7.15	3.4	3.11	0.008	0.1	1.94	0.086	4.67	0.34	0.051	0.08	1.79
6	6.98	3.4	1.97	<0.005	0.1	1.39	0.087	4.51	0.31	0.033	0.07	1.56
9	7.05	1.6	1.46	<0.005	0.1	0.64	0.057	4.93	0.2	0.045	<0.05	0.8
11	6.76	1.4	1.47	<0.005	<0.1	0.39	0.005	0.1	<0.05	0.006	<0.05	0.6
15	6.85	0.8	0.92	<0.005	<0.1	0.37	0.02	1.6	<0.05	0.02	<0.05	0.8
17	7.57	1.6	6.38	0.008	<0.1	1.01	0.01	0.93	<0.05	0.005	<0.05	0.8
18	7.54	1.4	5.83	0.007	<0.1	0.99	0.03	2.21	<0.05	0.01	<0.05	0.8
21	7.55	1	4.76	<0.005	0.1	0.33	0.005	0.46	<0.05	0.007	<0.05	6.23
26	7.38	2.1	4.59	<0.005	<0.1	1.08	0.038	3.63	0.2	0.01	<0.05	1.2
28	6.42	0.4	0.25	<0.005	<0.1	0.06	0.005	2.95	<0.05	0.046	<0.05	0.6
29	7.54	1.3	5.86	<0.005	0.1	0.57	0.02	1.4	0.06	0.007	<0.05	0.37
30	7.69	1.5	7.71	0.053	<0.1	1.62	0.12	3.41	<0.05	0.025	<0.05	1.5
37	6.5	0.6	0.13	0.008	<0.1	0.49	0.01	1	0.05	0.052	0.1	0.6
38	6.44	0.58	0.16	0.01	<0.1	1.04	0.02	1.5	0.1	0.048	0.09	1.4
60	6.85	0.94	2.47	0.006	<0.1	0.66	0.005	1.6	0.1	0.039	0.08	1.2
61	6.95	1.2	1.81	0.17	<0.1	11.7	0.02	3.8	0.46	0.081	0.09	25
62	7.09	1.4	3.1	0.006	<0.1	0.45	0.005	0.5	0.2	0.02	<0.05	1.1
HFK- opp	7.54	1.3	6.07	0.006	0.1	0.88	0.02	1.3	0.09	0.02	<0.06	1
HFK- ned	7.63	1.5	6.42	0.008	0.1	0.92	0.01	1.2	0.06	0.009	<0.07	0.7
br.1			3.52	1.07	23.4	43.1	12.3	1000	16.8	11	0.33	243
br.2			5.18	0.05	0.88	2.59	0.32	15.7	1.8	3.38	0.24	29.4
br.3			2.49	0.01	0.2	2.34	0.084	2.93	0.6	5.45	0.23	26.2
br.4	5.9	2	1.36	0.09	0.36	10.1	0.1	21	2	2.99	0.2	66.2
br.5	6.68	0.62	3.01	1.3	<0.1	6.38	0.005	2.46	1.1	0.11	<0.05	76.8
br.6	6.86	0.67	2.56	0.22	<0.1	1.04	0.005	0.63	0.48	0.23	0.05	34.3



Tabell 3 Analyseresultater fra Hjerkinnskytefelt 25.10.2006

st	pH	TOC mg/l	Ca mg/l	Cd µg/l	Cr µg/l	Cu µg/l	Fe mg/l	Mn µg/l	Ni µg/l	Pb µg/l	Sb µg/l	Zn µg/l
1	7.2	2.6	6.5	<0.01	0.26	1.5	0.017	0.31	0.85	0.073	<0.2	1.8
2	7.32	2.2	7.1	0.068	0.2	3	0.071	2	1	0.031	<0.2	39
5	7.09	3.2	4.7	0.01	0.34	1.9	0.1	5.7	0.57	0.058	<0.2	2.5
6	7.07	3.1	3.3	<0.01	0.24	1.2	0.088	4.5	0.41	<0.02	<0.2	1.4
9	7.05	1.8	2.3	<0.01	0.25	0.44	0.034	3.3	0.33	<0.02	<0.2	0.19
11	7.03	1.1	1.9	0.25	0.25	11	0.17	3.5	0.7	0.1	<0.2	0.61
15	7.19	0.99	2.4	<0.01	0.13	0.37	0.022	1.2	<0.2	<0.02	<0.2	0.9
17	7.51	2.2	8.6	0.011	0.26	1.1	0.079	11	0.4	<0.02	<0.2	2
18	7.47	1	10	0.016	0.24	0.87	0.13	13	0.31	0.32	<0.2	2.1
21			7.4	<0.01	0.25	0.52	0.017	1.1	<0.2	<0.02	<0.2	1.8
26	7.44	2.3	6.5	<0.01	0.12	1	0.052	6	0.29	<0.02	<0.2	1.3
28	6.55	0.21	0.4	<0.01	<0.05	<0.1	0.014	1.4	<0.2	<0.02	<0.2	1
29	7.67	0.93	8.2	<0.01	0.22	0.37	0.021	1.1	<0.2	<0.02	<0.2	1.5
30	7.88	1.2	9.3	0.025	0.17	1	0.063	4.8	0.2	<0.02	<0.2	1.5
37	6.99	0.27	0.2	<0.01	0.21	0.3	0.012	0.5	<0.2	0.021	<0.2	0.21
38	6.86	0.28	0.3	0.011	0.19	0.67	0.049	1.5	<0.2	<0.02	<0.2	0.21
HFK- ned	7.75	2.4	8.4	0.011	0.46	1.4	0.1	19	0.5	0.023	<0.2	0.83
HFK- opp	7.8	1	7.9	0.01	0.1	0.64	0.021	1.6	<0.2	<0.02	<0.2	1
br.1	7.17	0.56	2.6	0.92	0.24	4.4	0.009	1.5	1.6	0.84	<0.2	65
br.2	7.31	0.54	2.6	0.17	0.12	1.1	0.005	0.45	0.37	0.11	<0.2	33
br.3			1.8	0.12	2.7	8.1	1.2	160	3	1.5	0.23	22
br.4	7.86	2.4	28	0.21	6.9	14	13	180	32	6.3	0.31	30
br.5	7.69	0.24	5.1	0.02	0.74	1.5	0.082	2.7	1.3	0.75	<0.2	4
br.6	6.78	6.5	6.4	0.84	30	93	30	3400	55	12	1.6	340
br.7	7.38	0.2	2.7	0.012	0.83	2.3	0.29	14	1.6	3.1	0.27	4.6
br.8	6.65	2.1	2	0.14	0.72	18	0.16	30	3.1	2.1	0.22	100